



PCT/FR 2004/002540

REC'D 17 DEC 2004

WIPO

PCT

# BREVET D'INVENTION

**CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION**

## COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 18 OCT. 2004

Pour le Directeur général de l'Institut  
national de la propriété industrielle  
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

**DOCUMENT DE  
PRIORITÉ**

**PRÉSENTÉ OU TRANSMIS  
CONFORMÉMENT À LA RÈGLE  
17.1.-a)-OU-b)**

**INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE**

**SIEGE**  
26 bis, rue de Saint-Petersbourg  
75800 PARIS cedex 08  
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04  
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23  
[www.inpi.fr](http://www.inpi.fr)

<p>REMISE DES PIÈCES DATE <b>9 OCT 2003</b> LIEU <b>75 INPI PARIS</b> N° D'ENREGISTREMENT <b>0311809</b> NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE PAR L'INPI <b>09 OCT. 2003</b></p>		<p><b>1 NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE</b>  PONTET ALLANO &amp; Associés Selarl  25 rue Jean Rostand Parc Club Orsay Université  91893 ORSAY Cedex</p>	
<p><b>Vos références pour ce dossier (facultatif)</b> IFBA03 OXX ISO</p>			
<p><b>Confirmation d'un dépôt par télécopie</b></p>		<p><input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie</p>	
<p><b>2 NATURE DE LA DEMANDE</b></p>		<p><b>Cochez l'une des 4 cases suivantes</b></p>	
<p>Demande de brevet <input checked="" type="checkbox"/></p>			
<p>Demande de certificat d'utilité <input type="checkbox"/></p>			
<p>Demande divisionnaire <input type="checkbox"/></p>			
<p><i>Demande de brevet initiale</i> N° _____ Date _____</p>			
<p><i>ou demande de certificat d'utilité initiale</i> N° _____ Date _____</p>			
<p>Transformation d'une demande de brevet européen <input type="checkbox"/></p>			
<p><i>Demande de brevet initiale</i> N° _____ Date _____</p>			
<p><b>3 TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)</b> "Dispositif laser à solide monolithique pompé par diode laser, et procédé mis en oeuvre dans un tel dispositif"</p>			
<p><b>4 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE</b></p>		<p>Pays ou organisation _____ N° _____ Date _____ Pays ou organisation _____ N° _____ Date _____ Pays ou organisation _____ N° _____ <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»</p>	
<p><b>5 DEMANDEUR (Cochez l'une des 2 cases)</b></p>		<p><input checked="" type="checkbox"/> <b>Personne morale</b> <input type="checkbox"/> <b>Personne physique</b></p>	
<p>Nom ou dénomination sociale <b>OXXIUS SA</b></p>			
<p>Forme juridique <b>Société anonyme</b></p>			
<p>N° SIREN _____</p>			
<p>Code APE-NAF _____</p>			
<p>Domicile Rue <b>5 rue Louis de Broglie</b></p>			
<p>siège Code postal et ville <b>12 213 010 LANNION</b></p>			
<p>Pays <b>FRANCE</b></p>			
<p>Nationalité <b>Française</b></p>			
<p>N° de téléphone (facultatif) _____</p>		<p>N° de télécopie (facultatif) _____</p>	
<p>Adresse électronique (facultatif) _____</p>			
<p><input type="checkbox"/> S'il y a plus d'un demandeur, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»</p>			



# BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE  
page 2/2

**BR2**

REMISE DES PIÈCES DATE <b>9 OCT 2003</b> LIEU <b>75 INPI PARIS</b> N° D'ENREGISTREMENT <b>0311809</b> NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI		Réservé à l'INPI	DB 540 W / 210502
<b>6 MANDATAIRE (s'il y a lieu)</b> Nom Prénom Cabinet ou Société N° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel		PONTET ALLANO & Associés Selarl	
Adresse	Rue	25 rue Jean Rostand Parc Club Orsay Université	
	Code postal et ville	19 1 18 13 ORSAY	
	Pays	FRANCE	
N° de téléphone (facultatif)		01 69 33 21 21	
N° de télécopie (facultatif)		01 69 41 95 88	
Adresse électronique (facultatif)			
<b>7 INVENTEUR (S)</b> Les demandeurs et les inventeurs sont les mêmes personnes		Les inventeurs sont nécessairement des personnes physiques <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non : Dans ce cas remplir le formulaire de Désignation d'inventeur(s)	
<b>8 RAPPORT DE RECHERCHE</b> Établissement immédiat ou établissement différé		Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformation) <input checked="" type="checkbox"/> Établissement immédiat <input type="checkbox"/> Établissement différé	
Paiement échelonné de la redevance (en deux versements)		Uniquement pour les personnes physiques effectuant elles-mêmes leur propre dépôt <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
<b>9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES</b>		Uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Requête pour la première fois pour cette invention (joindre un avis de non-imposition) <input type="checkbox"/> Obtenue antérieurement à ce dépôt pour cette invention (joindre une copie de la décision d'admission à l'assistance gratuite ou indiquer sa référence): AG <input type="text"/>	
<b>10 SÉQUENCES DE NUCLEOTIDES ET/OU D'ACIDES AMINÉS</b> Le support électronique de données est joint La déclaration de conformité de la liste de séquences sur support papier avec le support électronique de données est jointe		<input type="checkbox"/> Cochez la case si la description contient une liste de séquences <input type="checkbox"/>	
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes			
<b>11 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE</b> (Nom et qualité du signataire) Sylvain ALLANO CPI 96 03 03		VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI L. MARIELLO	

IFBA03 OXX ISO

" Dispositif laser à solide monolithique pompé par diode laser, et procédé mis en œuvre dans un tel dispositif."

5

La présente invention se rapporte à un dispositif laser à solide monolithique pompé par diode laser, et concerne plus particulièrement le laser à solide doublé  
10 intra-cavité monomode. Elle se rapporte également à un procédé mis en œuvre dans un tel dispositif.

La présente invention trouve une application particulièrement intéressante, mais non exclusive, dans le domaine de la génération de luminescence laser bleue ou  
15 verte.

L'émission laser d'un faisceau de bonne qualité spatiale et spectrale dans le visible à 473 nm par exemple, à partir d'une diode multimode présente beaucoup d'intérêt pour des applications industrielles et médicales notamment.  
20 Cette longueur d'onde, dite harmonique, peut s'obtenir à partir du doublage en fréquence d'une émission laser à une longueur d'onde, dite fondamentale, à 946 nm du grenat d'aluminium et yttrium dopé au néodyme (Nd:YAG).

D'une façon générale, un laser doublé intra-cavité  
25 comprend une diode laser pour pomper un laser à solide, tel que le Nd:YAG par exemple, formant amplificateur à 946 nm. Pour réaliser le doublage, on associe à l'amplificateur un cristal non linéaire convertissant le signal fondamental proche infrarouge en signal visible par doublage  
30 fréquentiel ("frequency doubling" en langue anglaise, aussi nommé "second harmonic generation SHG"). On obtient ainsi une longueur d'onde fondamentale divisée par deux. L'amplificateur et le cristal non linéaire sont contenus dans une cavité dont les deux surfaces extrêmes opposées  
35 dans le trajet du faisceau laser sont réfléchives pour certaines longueurs d'onde.

Cependant, si l'on s'intéresse à une émission continue, la puissance de l'émission fondamentale est inférieure à la puissance de la diode laser et le doublage de fréquence est alors très inefficace.

5 On connaît le brevet américain US 4 809 291, intitulé " Diode pumped laser and doubling to obtain blue light", dans lequel R.L. Byer et T.Y. Fan proposent un doublage intra-cavité pour augmenter la puissance d'une onde fondamentale à 946 nm et ainsi augmenter l'efficacité de  
10 doublage.

Dans un article intitulé "Efficient blue emission from an intracavity-doubled 946 nm Nd:YAG laser" publié en 1988 dans la revue Optics Letters (vol. 13, pp. 137-139); Dixon et al. présentent une émission de 5 mW de bleu (473 nm) par  
15 un micro-laser à base de Nd:YAG doublé intra-cavité. La concentration du Nd est de 1.1 at.%. L'efficacité de doublage n'est que de 2%.

Le problème principal de ces lasers doublés intra-cavité est la présence de modes axiaux et de polarisation parasites qui réduisent l'efficacité du laser et qui sont à  
20 l'origine de fortes fluctuations de puissance. En exemple, Matthews et al., dans un article intitulé "Diode pumping in a blue (473 nm) Nd:YAG/KNbO<sub>3</sub> microchip laser" (CLEO'96, vol. 9, p. 174) produisent 26.5 mW de bleu avec des fluctuations  
25 d'intensité supérieures à 10%.

Plus précisément, le doublage de fréquence intra-cavité induit des pertes sélectives qui sont croissantes avec la puissance de pompe pour l'émission laser dominante. Lorsque l'efficacité de doublage augmente, l'inversion de  
30 population moyenne de la cavité doit augmenter pour compenser l'excès de perte. Toutefois, cela permet aux modes adjacents et à l'émission de polarisation orthogonale de commencer à laser. Pour les modes adjacents, cet effet s'ajoute à celui du "hole burning spatial" qui permet déjà  
35 aux modes adjacents de laser.

Les différents modes lasant dans la cavité sont couplés dans le milieu amplificateur (compétition pour le gain) et dans le milieu doubleur de fréquence (addition de fréquences). Ces couplages sont non linéaires et  
5 participent à une dynamique non linéaire complexe. Cette dernière se traduit par une fluctuation de puissance forte voire chaotique.

Si le doublage de fréquence est de "Type I", les modes de polarisation orthogonale ne subissent pas de doublage de  
10 fréquence efficace (absence d'adaptation de phase entre le fondamental et l'harmonique). Ces modes stabilisent l'inversion de population en croissant avec la puissance de pompe. Ils ralentissent l'efficacité de conversion qui a besoin d'une augmentation d'inversion de population pour  
15 croître. Seuls des effets de "hole burning spatial" autorisent une légère croissance de l'efficacité de conversion.

Plusieurs méthodes ont été présentées pour rendre le laser monomode ou pour découpler les modes dans le cristal,  
20 non linéaire. Elles peuvent être rangées dans trois catégories :

a) La première est l'introduction d'un étalon dans la cavité. Cette méthode, divulguée notamment dans le brevet américain US 5,838,713 de Y. Shimoji, pose plusieurs  
25 problèmes. En effet, l'étalon induit des pertes dans la cavité, sauf s'il est formé par les faces du YAG et du cristal doubleur. Dans ce dernier cas, il requiert une très grande précision de positionnement (sub-micrométrique) difficile à obtenir de manière industrielle et à  
30 stabiliser. Une manière de résoudre ce problème est de contacter optiquement le milieu amplificateur avec le cristal doubleur en incluant un angle sur une partie de la face de contact. Cet angle induit un petit espacement d'air entre les deux matériaux. Cette méthode fragilise le  
35 contact et donc l'intégrité d'un laser monolithique et ne permet pas la protection de l'interface par une colle.

b) La seconde catégorie joue sur la polarisation du fondamental. Le milieu amplificateur peut être inséré entre deux lames quart d'onde pour éviter l'effet "hole burning spatial", voir notamment G. Hollemann et al., dans  
5 "Frequency-stabilized diode-pumped Nd:YAG laser at 946 nm with harmonics at 473 nm and 237 nm", Opt. Lett. 19, p.192 en février 1994. Un inconvénient de cette méthode est l'introduction de pertes dans la cavité.

Par doublage de Type I, on entend une réalisation dans  
10 laquelle le faisceau laser fondamental se propage sur l'un des axes optiques du cristal (en général l'axe lent) et le faisceau laser harmonique se propage sur l'autre axe optique du cristal, orthogonal au premier. On fait du doublage de type I lorsqu'il est possible de couper le  
15 cristal de manière à égaler l'indice de réfraction d'un axe optique à la longueur d'onde fondamentale avec l'indice de réfraction de l'autre axe optique à la longueur d'onde harmonique. C'est le cas du  $\text{KNbO}_3$ )

Par doublage de type II, on entend une réalisation  
20 dans la quelle le faisceau laser fondamental est présent sur les deux axes et le coefficient de conversion est optimisé lorsque la polarisation du laser fondamental fait un angle de  $45^\circ$  par rapport aux axes optiques.

c) La troisième méthode consiste à réduire la longueur  
25 de la cavité. Elle a été proposée par A. Mooradian dans le brevet US 5,256,164 oct. 1993. Pour une largeur de raie d'émission à 946 nm de 1 nm (comparée à 0.6 nm pour la raie à 1.064  $\mu\text{m}$ ), la formule de Mooradian impose une longueur de cavité inférieure à 300  $\mu\text{m}$ , incluant le YAG et le  $\text{KNbO}_3$ . La  
30 concentration en Nd dans les microchips publiés ou brevetés à ce jour n'excède pas 1.1 at.%. Cela correspond à une atténuation de  $0.85 \text{ mm}^{-1}$  à 808.4 nm, c'est à dire 8.1 % de pompe absorbée par 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur et 15.6% de pompe absorbée par 200  $\mu\text{m}$ . D'autre part, les 100 ou 200 nm de  
35  $\text{KNbO}_3$  n'apportent pas une efficacité de conversion

suffisante. Ainsi, un laser microchip suivant l'inégalité de Mooradian semble ne pas être en mesure d'émettre plus de quelques mW de bleu avec 1 W de pompe d'une diode laser.

Par ailleurs, on connaît une méthode efficace proposée  
5 par T. Y. FAN., "Single-Axial Mode, Intracavity Doubled Nd:YAG Laser", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol27, 09sept1991, pour rendre un laser doublé intra-cavité mono-fréquence. Dans cette méthode, le milieu amplificateur (Nd:YAG) est coupé à l'angle de Brewster par rapport à  
10 l'air. Le cristal non linéaire, biréfringent, est attaqué à 45° par le fondamental (doublage de type II). La fenêtre de Brewster induit des pertes importantes à la polarisation orthogonale et l'empêche de laser. Elle induit également des pertes à toute longueur d'onde dont la polarisation a  
15 été tournée par le cristal biréfringent. Cette modulation de perte en fonction de la longueur d'onde peut rendre le laser monomode. Cette méthode ne s'applique cependant pas à un doublage de fréquence de Type I car le signal à la fréquence fondamentale est sur l'un des axes optiques du  
20 cristal non linéaire. D'autre part, à cause de la double réfraction, il n'est pas possible d'accoler le cristal amplificateur coupé à l'angle de Brewster avec le cristal non linéaire. En effet, la double réfraction introduit des effets de phase qui font que les faisceaux réfléchis par la  
25 face externe de la cavité ne se recombinent pas lorsqu'ils retournent dans l'amplificateur.

La présente invention vise à remédier à la plupart des inconvénients précités en proposant un laser à solide doublé intra-cavité qui présente une dimension compacte,  
30 offre une grande stabilité de fonctionnement, et autorise des doublages de fréquence de Type I et II. Un autre but de l'invention est de proposer un laser à solide accordable capable de fonctionner en monomode. L'invention a encore pour but un laser à solide puissant quel que soit le niveau  
35 de puissance de la diode-laser de pompage.



On atteint au moins l'un des buts précités avec un dispositif laser comprenant :

- un moyen de pompage optique, de préférence une diode laser,
- 5       - un milieu amplificateur excité par un faisceau laser de longueur d'onde fondamentale émis par le moyen de pompage optique, la face de sortie de ce milieu amplificateur étant coupée selon l'angle de Brewster pour ladite longueur d'onde fondamentale, et
- 10       - un cristal biréfringent de doublage de fréquence.

Selon l'invention, le dispositif comprend en outre un milieu isotrope intercalé entre la face de sortie du milieu amplificateur et la face d'entrée du cristal biréfringent, le milieu amplificateur et le cristal biréfringent étant  
15       solidaires l'un de l'autre de façon à constituer une cavité résonnante monolithique ou composite. De plus, l'axe cristallin "c" du cristal biréfringent fait un angle  $\theta_0$  non nul par rapport à la direction orthogonale de la polarisation de l'onde fondamentale, définie par la surface  
20       de Brewster.

Avec ce dispositif selon l'invention, l'interface entre le milieu isotrope et le cristal biréfringent est proche de la normale. Ce milieu isotrope intercalaire permet de limiter les effets de la double réfraction du  
25       cristal biréfringent : en effet, lorsque l'angle d'incidence tend vers la normale, l'angle de la double réfraction tend vers zéro. On peut ainsi solidariser le milieu amplificateur avec le cristal biréfringent (le doubleur) de façon à obtenir un composant compact, ce qui  
30       n'est pas le cas dans le document de T. Y. Fan de 1991.

La combinaison d'une interface à l'angle de Brewster et d'un cristal biréfringent hors axe permet de sélectionner un unique mode. En effet, l'interface de Brewster induit une perte sélective à la polarisation  
35       orthogonale. Seules les longueurs d'ondes pour lesquelles

le déphasage dû à la biréfringence est un multiple de  $2\pi$  conservent la polarisation à faible perte à l'interface de Brewster. En ajustant notamment la longueur du cristal non linéaire, il est possible de ne sélectionner qu'un unique  
5 mode dans la bande d'émission. En d'autres termes, l'indice du milieu isotrope et l'angle  $\theta_c$  associés à la longueur de la cavité peuvent être ajustés afin de n'autoriser qu'un seul mode dans la cavité.

Ainsi, même dans le cas d'un doublage de type II, il  
10 peut être judicieux de prendre un angle  $\theta_c$  différent de  $45^\circ$ .

Par ailleurs, lorsque l'efficacité de doublage est forte, il est possible d'augmenter les pertes des modes adjacents en augmentant  $\theta_c$ .

Selon une caractéristique avantageuse de l'invention,  
15 la face d'entrée et/ou la face de sortie du cristal biréfringent est coupée selon un léger angle  $\varepsilon$  par rapport à la normale à la direction de propagation du faisceau laser. Ainsi les faces d'entrée et de sortie ne sont plus tout à fait parallèles. Cette caractéristique est remarquable par  
20 le fait que, dans les doublages conventionnels, l'angle  $\varepsilon$  est toujours égal à zéro afin d'éviter toute double réfraction. Imposer un angle  $\varepsilon$  non nul va donc à l'encontre des pratiques conventionnelles. En fonction des caractéristiques du dispositif (dimension de la cavité,  
25 indice,  $\theta_c$ , ...) l'homme du métier peut déterminer un angle  $\varepsilon_{\max}$  au delà duquel le spectre de transmission au niveau de la face de Brewster ne présente plus de pic de transmission. A titre d'exemple,  $\varepsilon$  peut être choisi inférieur ou égal à  $1^\circ$ .

30 Cet angle  $\varepsilon$  induit une légère double réfraction dans les deux orientations parallèle et orthogonale. Il peut être introduit dans la dimension parallèle à la polarisation. La légère double réfraction alors introduite dans le trajet du signal peut être compensée par la

lentille thermique induite par la pompe dans la mesure où  $\varepsilon$  est faible. Mais, de préférence,  $\varepsilon$  est introduit dans la dimension orthogonale à la polarisation.

5 D'une façon générale, cet angle  $\varepsilon$  permet avantageusement de faire varier la longueur du cristal biréfringent par simple translation de la pompe (et donc du signal). Cette variation de longueur permet d'accorder la fréquence de la cavité.

10 Selon l'invention, le plan orthogonal à la direction de propagation de l'onde fondamentale peut avantageusement contenir l'axe cristallin "c", et faire un angle par rapport aux axes "a" et "b" du cristal biréfringent de façon à obtenir un accord de phase à la température de fonctionnement entre l'onde fondamentale et l'onde  
15 harmonique (onde doublée).

La taille de la cavité n'est plus le seul paramètre modifiable pour obtenir un fonctionnement monomode. Le choix judicieux des milieux, de leur indice de réfraction et de leur dimension, de l'orientation du cristal  
20 biréfringent, permet un fonctionnement monomode et stable.

Le milieu amplificateur peut être constitué par le grenat d'aluminium et yttrium (YAG) dopé au néodyme (Nd). Ce cristal peut être de forme cylindrique avec une face d'entrée formant un miroir plan.

25 Le cristal biréfringent est avantageusement constitué à partir du niobate de potassium ( $\text{KNbO}_3$ ).

Selon une première variante de l'invention, le milieu isotrope est un matériau cristallin constitué à partir du tantalate de potassium ( $\text{KTaO}_3$ ). Les trois milieux sont alors  
30 accolés les uns aux autres.

Selon une seconde variante de l'invention, le milieu isotrope est l'air. Dans ce cas, l'état de surface de la face de sortie de l'amplificateur et de la face d'entrée du cristal biréfringent ne requiert pas une pureté excessive.

De préférence, on prendra soin de choisir un milieu isotrope constitué par un cristal isotrope dont l'indice de réfraction est proche, par exemple à 10% près, de l'indice de réfraction du cristal biréfringent. Cela minimise les effets de double réfraction et permet donc une tolérance plus grande sur l'angle d'attaque du signal par rapport à l'interface (autour de la normale).

Suivant un autre aspect de l'invention, il est proposé un procédé dans lequel on fait varier le chemin optique parcouru par le faisceau laser en faisant translater le faisceau laser émis par le moyen de pompage par rapport à la face d'entrée de l'amplificateur. Plus précisément, on déplace le faisceau laser selon un plan dans lequel la distance parcourue par ce faisceau laser dans l'amplificateur varie en fonction de la latitude de la traversée.

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée d'un mode de mise en œuvre nullement limitatif, et des dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 est une vue en coupe schématique d'un dispositif laser comportant trois cristaux accolés selon l'invention;

- les figures 2 à 7 sont des graphes illustrant le niveau de puissance des différents modes régnant dans la cavité résonante du dispositif de la figure 1; et

- la figure 8 est une vue en coupe schématique d'une variante du dispositif selon l'invention dans lequel le matériau intermédiaire est remplacé par l'air ambiant.

Bien que l'invention n'y soit pas limitée, on va maintenant décrire un dispositif laser monolithique doublé en fréquence en intra-cavité comportant un laser Nd:YAG émettant à 946 nm, doublé intra-cavité à 473 nm avec un cristal de  $\text{KNbO}_3$

~~En référence à la figure 1, on voit une diode laser de pompage 10 émettant un faisceau laser 11 à 808 nm vers une~~

cavité 1 composée d'un assemblage de trois cristaux 2, 3 et 4. Le cristal amplificateur 2 est du Nd:YAG. Son indice de réfraction est  $n_1 = 1.82$  à 946 nm. La face d'entrée 6 de ce cristal 2 est traitée de façon à constituer un miroir plan. Sa face de sortie 7 est taillée à l'angle de Brewster calculé à partir de l'indice  $n_1$  et de l'indice  $n_2$  du cristal isotrope 3. Les deux cristaux 2 et 3 sont accolés l'un à l'autre sur une partie de la face 7.

Le cristal isotrope 3 est constitué de tantalate de potassium  $\text{KTaO}_3$  d'indice  $n_2$  égale à 2.179 à 946 nm. Sur sa face de sortie 8, on accole un cristal doubleur de fréquence biréfringent 4 constitué de niobate de potassium  $\text{KNbO}_3$  dont l'indice de réfraction et le diamètre sont sensiblement identiques à ceux du cristal isotrope 3.

Les deux cristaux 3 et 4 ont leurs axes géométriques colinéaires. Le cristal isotrope 3 est taillé à la face 7 de telle sorte que le faisceau laser 5 sortant du Nd:YAG 2 et dévié par la face 7, traverse les cristaux 3 et 4 parallèlement à leurs axes géométriques.

La face d'entrée 6 du Nd:YAG 2 et la face de sortie 9 du  $\text{KNbO}_3$  4 sont traitées de façon conventionnelle afin de constituer une cavité résonnante. Le faisceau sortant de la face 9 peut être à 946 nm ou à 473 nm.

Le schéma de la figure 1 est basé sur une polarisation verticale du signal à 946 nm dans le Nd:YAG. L'axe vertical est situé dans le plan de la figure, l'axe horizontal étant perpendiculaire à ce plan. L'homme du métier saura aisément adapter ce schéma pour une polarisation linéaire horizontale ou quelconque.

Dans le cristal biréfringent  $\text{KNbO}_3$ , la face d'entrée 8 contient l'axe c et coupe le plan ab selon un angle  $\phi = 32^\circ$  par rapport à l'axe b de façon à obtenir un accord de phase entre les longueurs d'onde 946 nm et 473 nm à 308 K. L'homme du métier saura modifier cet angle pour une adaptation de phase à d'autres températures. A 946 nm, l'indice de réfraction sur l'axe c est  $n_{3f} = 2.127$  et

l'indice de réfraction sur l'axe orthogonal est  $n_{3s} = 2.238$ . La biréfringence est donc caractérisée par  $\Delta n_3 = 0.111$

L'angle de la face 7  $\phi_a$  est l'angle de Brewster entre le YAG et le  $\text{KTaO}_3$ . Il est déterminé par la relation  $\tan(\phi_a) = n_2/n_1$ . La face 8 est coupée à un angle  $\varepsilon$  de la normale à la direction de propagation du faisceau à 946 nm émis orthogonalement à la face d'entrée 6.  $\phi_b$  et  $\phi_c$  sont respectivement les angles des faces 8 et 9, et sont déterminés par  $\phi_b \cong 2\phi_a - \pi/2 + \varepsilon$  et  $\phi_c \cong 2\phi_a - \pi/2 + \varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_1$  ayant des valeurs préférentielles comprises entre  $\varepsilon(1-n_2/n_{3s})$  et  $\varepsilon(1-n_2/n_{3f})$ . La tolérance sur  $\phi_b$  est de l'ordre de  $1^\circ$ , elle est limitée par les effets de double réfraction. La tolérance sur  $\phi_c$  est inférieure à quelques minutes d'angles, car c'est cette dernière face qui referme la cavité.

Encore sur la figure 1, pour " $y$ " = 0, sur l'axe vertical, le signal se propage sur 2 mm dans chacun des trois cristaux 2, 3 et 4. Les distances respectives de propagation dans les trois milieux pour " $y$ " < 0 se déduisent aisément des trois angles  $\phi_a$ ,  $\phi_b$  et  $\phi_c$ . La distance optique  $L_o$ , produit des distances et des indices se calcule aisément en fonction de " $y$ ". L'angle  $\varepsilon$  est choisi égal à 0.003 rad ou  $10'$  d'angle. Les fréquences optiques pouvant se propager dans la cavité sont proportionnelles à  $C/2L$  avec  $C$  la vitesse de la lumière dans le vide. Elles sont représentées par des croix et des cercles sur les figures 2 à 7.

Les figures 2 à 7 montrent les pertes induites par la face 7 à l'angle de Brewster lors d'un aller-retour dans la cavité constituée par les trois cristaux 2, 3 et 4 pour un signal se propageant avec une polarisation verticale et horizontale. L'angle de coupe du cristal biréfringent 4, c'est à dire l'angle de l'axe  $c$  avec l'horizontal, est  $\theta_c = 0.3$  rad. Le milieu amplificateur 2 est susceptible

d'apporter du gain sur une bande de 1 nm centrée autour de 946.6 nm. Les pertes de l'ensemble des modes amplifiés sont calculées puis reportées sur les figures 2 à 7. Sur la figure 2, les pertes de la polarisation orthogonale sont également représentées (sous forme de cercles). Elles ne sont pas représentées par la suite, car elles sont trop importantes pour permettre une oscillation laser.

La polarisation du signal fondamental est la verticale dans le cas présenté. Si l'axe c était horizontal, les axes optiques seraient horizontaux et verticaux. Le signal fondamental se propagerait alors dans un axe de la biréfringence et sa polarisation ne pourrait plus être tournée. Si l'axe c et donc les axes de biréfringence sont tournés comme dans le cas présent, le fondamental n'est plus dans les axes de biréfringence et sa polarisation est donc tournée lors de la propagation dans le cristal. La sélection de mode par rotation de polarisation peut alors jouer.

La position verticale "y" du faisceau laser est variée sur les figures 3 à 7. Lorsque "y" remonte de -1.4 mm à -0.8 mm, l'ensemble des longueurs d'onde de la bande d'émission peut être sélectionné successivement. Nous voyons sur les figures 4 et 5 que le choix judicieux de  $n_2$ , de la longueur du cristal 4 biréfringent  $\text{KNbO}_3$  et de  $\theta_c$  permettent de ne sélectionner qu'un unique mode. Le faible rapport  $n_2/n_1$ , permet notamment une faible largeur du pic de transmission, rendant le filtre très sélectif. L'angle  $\theta_c$  peut être augmenté pour induire plus de pertes sur les modes adjacents. Il suffit d'un déplacement vertical de 1.2 mm pour retrouver la même sélection de mode (voir sur les figures 3 et 7). Le laser est donc monomode et accordable par une simple translation des cristaux par rapport à la diode laser.

Sur la figure 8 est représentée une variante préférentielle du dispositif selon l'invention dans lequel le milieu isotrope est constitué par l'air.

Le dispositif de pompage n'est pas représenté.

La face de sortie 14 du laser Nd:YAG 12 est taillée selon l'angle de Brewster. Une partie supérieure de cette face 14 est destinée au passage du faisceau laser à 946 nm.

5 Sur une partie inférieure de la face 14, on accole un cristal biréfringent 13 à base de  $\text{KNbO}_3$ . Ce dernier est taillé de telle sorte que le faisceau laser 16 sortant du Nd:YAG et ayant traversé l'air, atteint la face d'entrée 17 de ce cristal 13. Dans le trajet du faisceau laser, aucun  
10 matériau n'est disposé entre la face de sortie 14 du laser Nd:YAG et la face d'entrée 17 du cristal biréfringent 13. L'avantage d'une telle variante est une exigence moindre quant à l'état des surfaces sur la zone d'encollage 15.

Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux exemples  
15 qui viennent d'être décrits et de nombreux aménagements peuvent être apportés à ces exemples sans sortir du cadre de l'invention.



## REVENDICATIONS

## 1. Dispositif laser comprenant :

- un moyen de pompage optique (10),
  - 5        - un milieu amplificateur (2) excité par un faisceau laser (11) de longueur d'onde fondamentale émis par le moyen de pompage optique, la face de sortie (7) de ce milieu amplificateur étant coupée selon l'angle de Brewster pour ladite longueur d'onde fondamentale, et
  - 10        - un cristal biréfringent (4) de doublage de fréquence;
- caractérisé en ce qu'il comprend en outre un milieu isotrope (3) intercalé entre la face de sortie (7) du milieu amplificateur et la face d'entrée (8) du cristal
- 15        biréfringent, le milieu amplificateur (2) et le cristal biréfringent (4) étant solidaires l'un de l'autre de façon à constituer une cavité résonnante monolithique; et en ce que l'axe cristallin "c" du cristal biréfringent fait un
- 20        angle  $\theta_c$  non nul par rapport à la direction orthogonale de la polarisation de l'onde fondamentale, définie par la surface de Brewster.

2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que la face d'entrée (8) du cristal biréfringent est coupée
- 25        selon un léger angle  $\varepsilon$  par rapport à la normale à la direction de propagation du faisceau laser (5).

3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la face de sortie (9) du cristal biréfringent est
- 30        coupée selon un léger angle  $\varepsilon$  par rapport à la normale à la direction de propagation du faisceau laser (5).

4. Dispositif selon la revendication 2 ou 3, caractérisé en ce que l'angle  $\varepsilon$  est inférieur ou égal à un degré.

5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le plan orthogonal à la direction de propagation de l'onde fondamentale contient l'axe cristallin "c", ce plan faisant un angle par rapport aux axes "a" et "b" du cristal biréfringent de façon à obtenir un accord de phase à la température de fonctionnement entre l'onde fondamentale et l'onde harmonique.
6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le milieu amplificateur (2) est constitué par le grenat d'aluminium et yttrium (YAG) dopé au néodyme (Nd).
7. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que le milieu amplificateur (2) est un Nd:YAG cylindrique dont la face d'entrée constitue un miroir plan.
8. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le moyen de pompage (10) est une diode laser.
9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le cristal biréfringent (4) est constitué à partir du niobate de potassium ( $\text{KNbO}_3$ ).
10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le milieu isotrope est l'air.
11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que le milieu isotrope est constitué à partir du tantalate de potassium ( $\text{KTaO}_3$ ).
12. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que le milieu isotrope est constitué

par un cristal isotrope dont l'indice de réfraction est proche, tel qu'à dix pourcent près, de l'indice de réfraction du cristal biréfringent.

- 5 13. Procédé mis en œuvre dans un dispositif laser selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'on fait varier le chemin optique parcouru par le faisceau laser en faisant translater le faisceau laser émis par le moyen de pompage par rapport à  
10 la face d'entrée de l'amplificateur.

-1/2

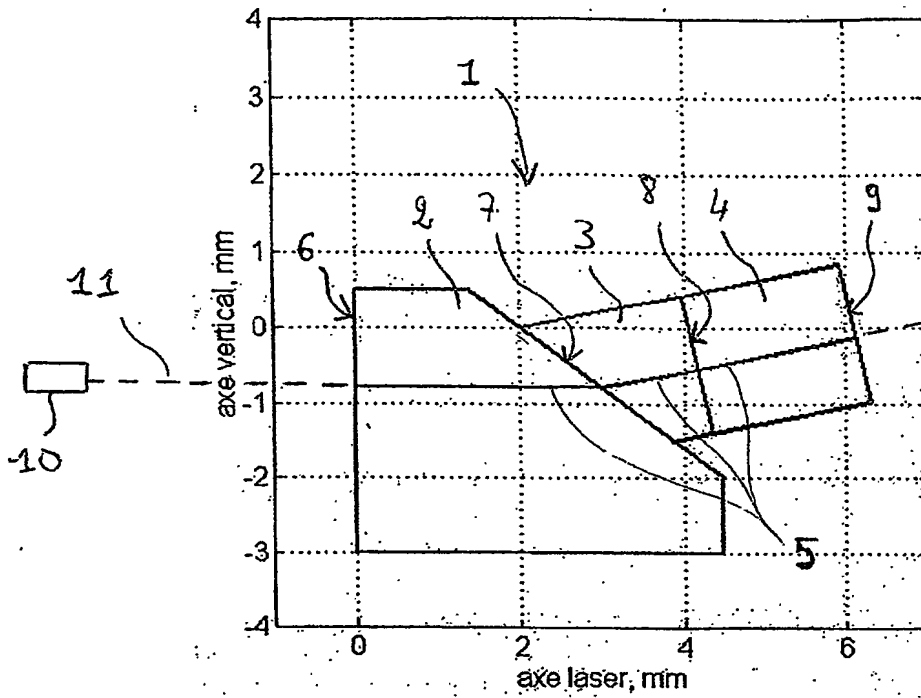


FIGURE 1

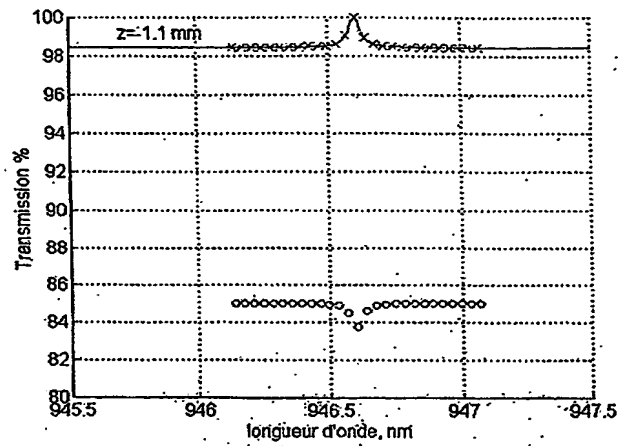


FIGURE 2

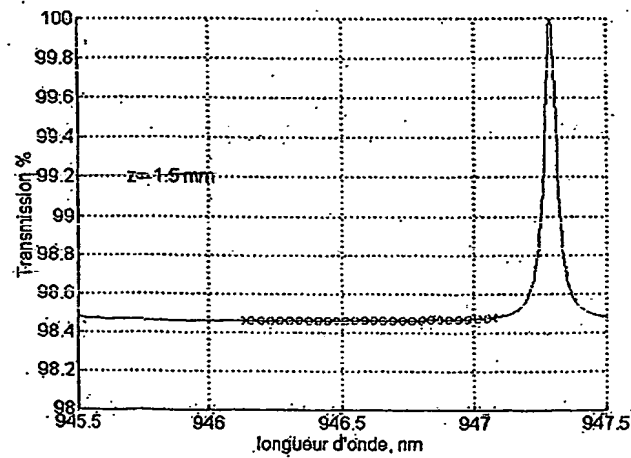
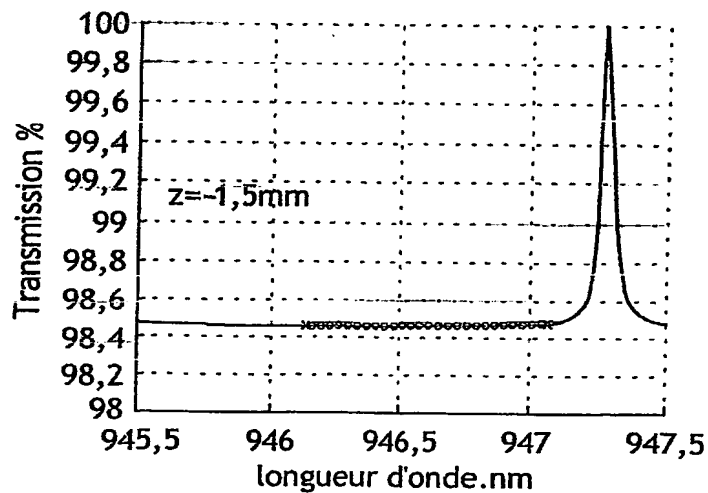
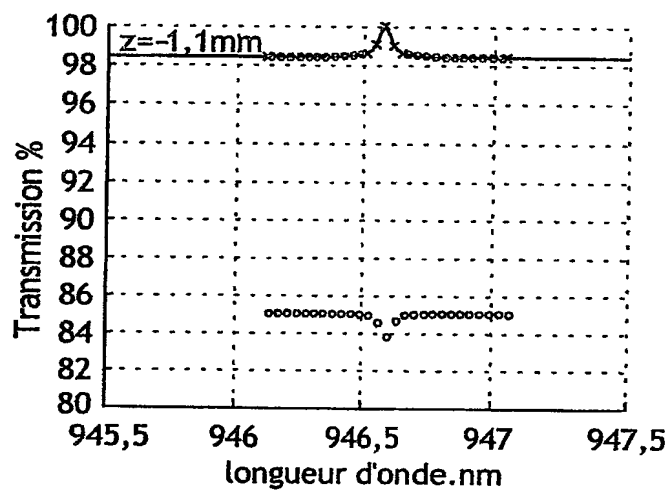
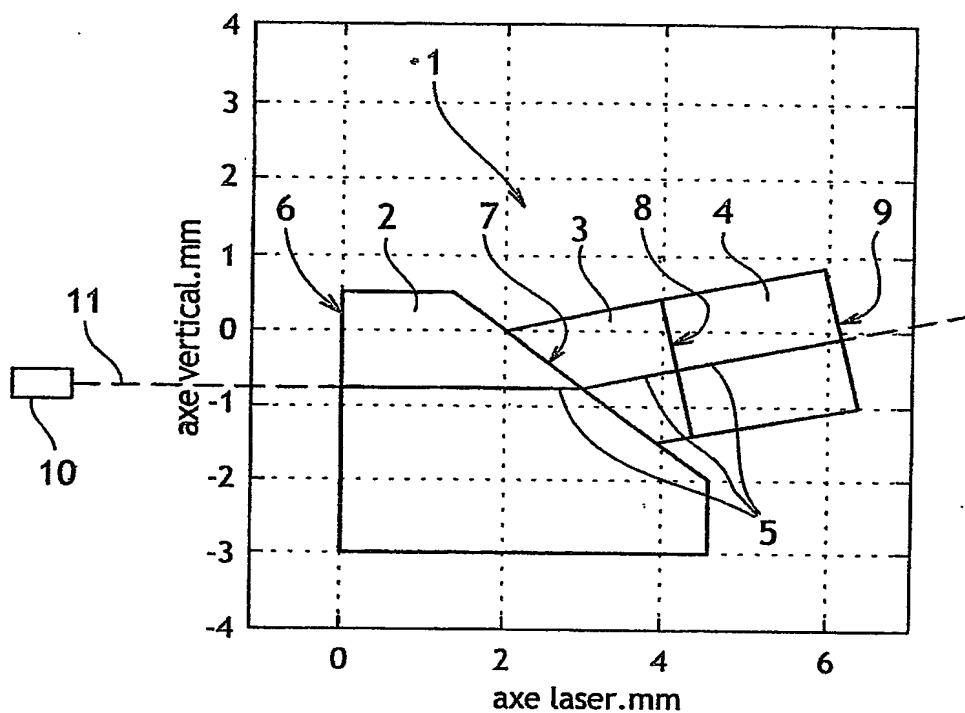


FIGURE 3

1/2



2/2

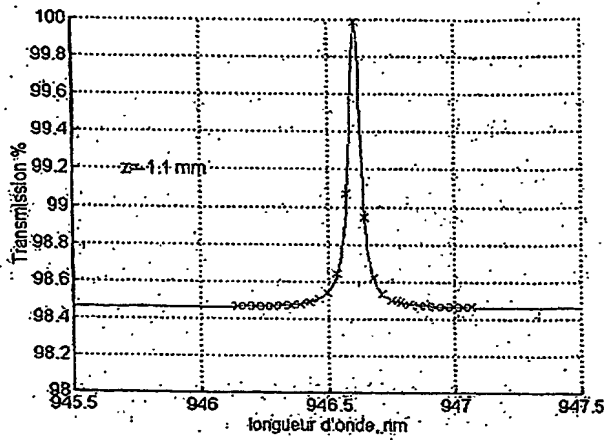


FIGURE 4

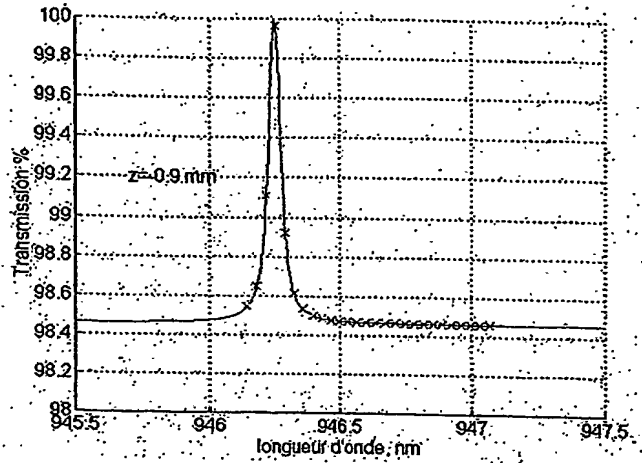


FIGURE 5

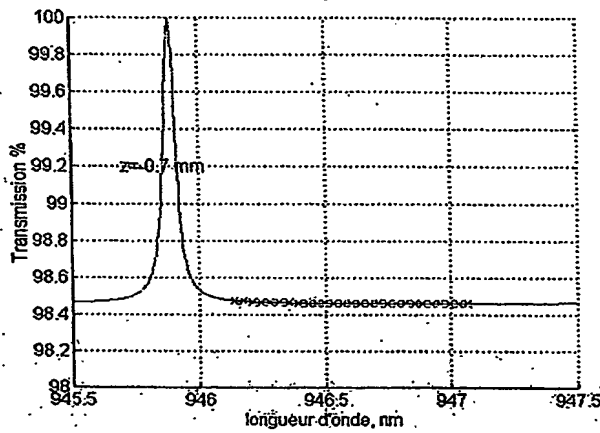


FIGURE 6

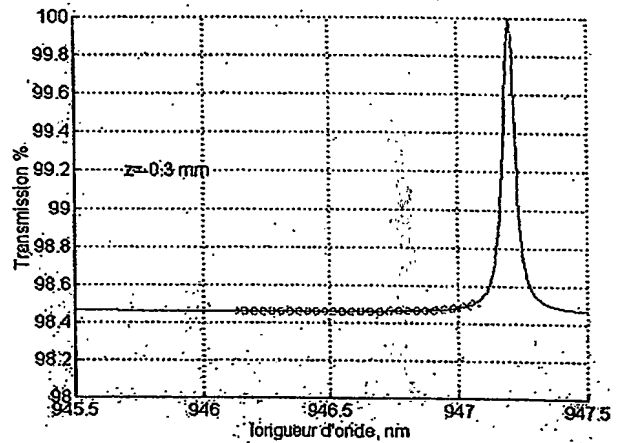
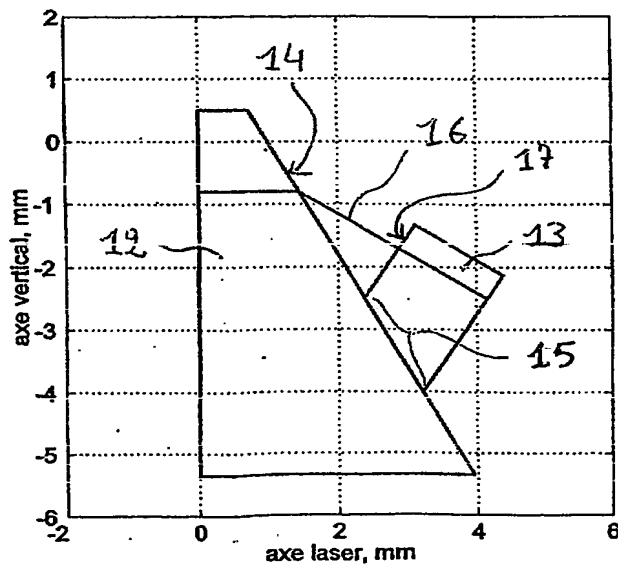


FIGURE 7

FIGURE 8



2/2

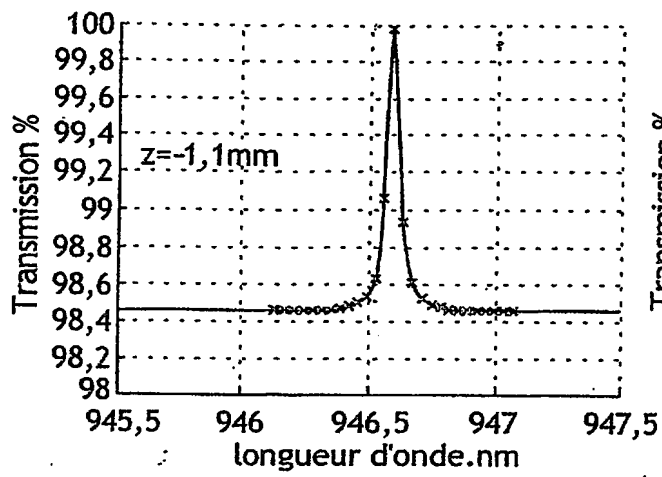


FIG.4

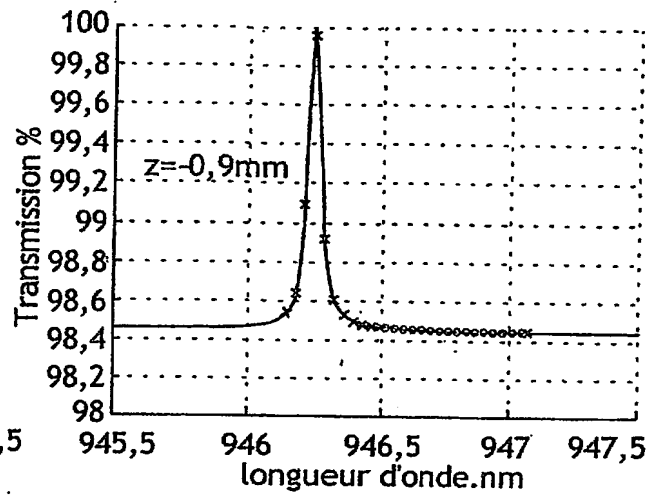


FIG.5

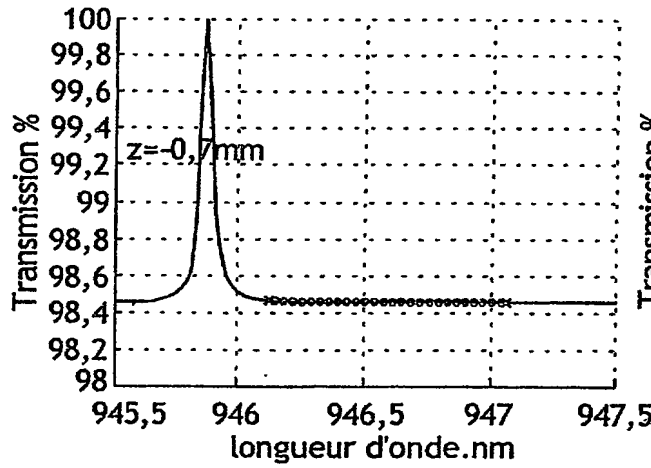


FIG.6

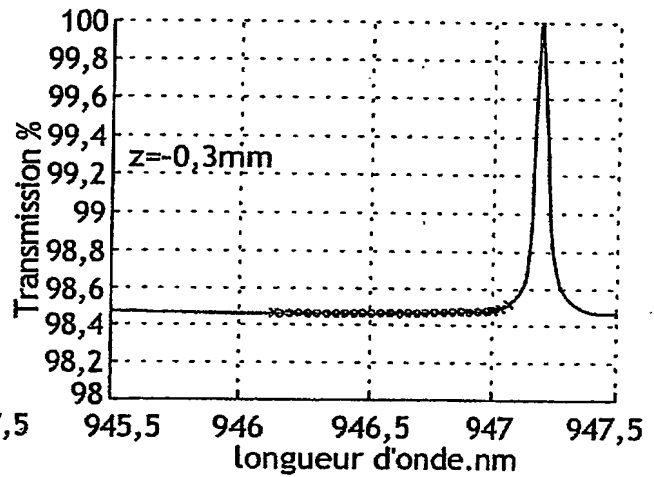


FIG.7

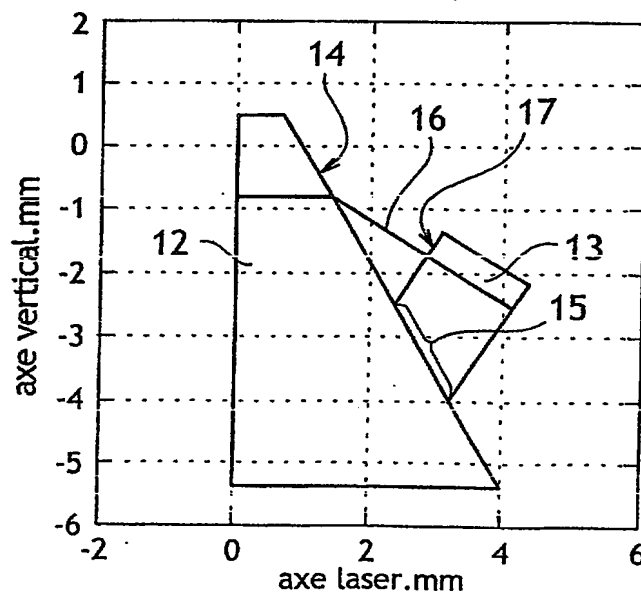


FIG.8

DÉPARTEMENT DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg

75800 Paris Cedex 08

Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

**DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S)** Page N° 1.../1...

(À fournir dans le cas où les demandeurs et les inventeurs ne sont pas les mêmes personnes)

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 @ W / 270601

**INV**

<b>Vos références pour ce dossier (facultatif)</b>		IFBA03 OXX ISO
<b>N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL</b>		0311809
<b>TITRE DE L'INVENTION</b> (200 caractères ou espaces maximum)		
"Dispositif laser à solide monolithique pompé par diode laser, et procédé mis en oeuvre dans un tel dispositif"		
<b>LE(S) DEMANDEUR(S) :</b>		
OXXIUS SA Société anonyme 5 rue Louis Broglie 22300 LANNION FRANCE		
<b>DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) :</b>		
<b>1</b>	Nom	GEORGES
	Prénoms	Thierry
Adresse	Rue	14 Chemin de Kergadic
	Code postal et ville	22270 PERROS-GUIREC
Société d'appartenance (facultatif)		
<b>2</b>	Nom	
	Prénoms	
Adresse	Rue	
	Code postal et ville	
Société d'appartenance (facultatif)		
<b>3</b>	Nom	
	Prénoms	
Adresse	Rue	
	Code postal et ville	
Société d'appartenance (facultatif)		
S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez plusieurs formulaires. Indiquez en haut à droite le N° de la page suivi du nombre de pages.		
<b>DATE ET SIGNATURE(S)</b>		
<b>DE(S) DEMANDEUR(S)</b>		
<b>OU MANDATAIRE</b>		
(Nom et qualité du signataire)		
Sylvain ALLANO		
CPI 03 03		



PCT/FR2004/002540

